

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.020

6种文丘里施肥器吸肥性能比较分析*

韩启彪^{1,2} 黄兴法³ 刘洪禄⁴ 吴文勇⁴ 范永申^{1,2}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002; 2. 河南省节水农业重点实验室, 新乡 453002;

3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 4. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要: 对北京地区微灌常用的6种文丘里施肥器进行了试验,在理论分析的基础上结合相关数据,建立了6种文丘里施肥器吸肥量、入口流量、临界流量和临界压差的回归模型并进行了比较分析。结果表明:进、出口压力直接影响了施肥器的吸肥量和入口流量,施肥器 YR、RF 对压力波动等不利工况较敏感,而 AD 系列和 NF 则更能适应波动的工作压力环境。NF 和 AD-1 等临界压差小,工作区间大;而 RF 和 YR 工作区间小,只有临界压差达到进口压力 1/2 以后才可正常吸肥。文丘里施肥器的结构对其水力性能影响较大。

关键词: 文丘里施肥器 吸肥性能 吸肥量 入口流量 临界压差 临界流量

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0113-05

Comparative Analysis on Fertilization Performance of Six Venturi Injectors

Han Qibiao^{1,2} Huang Xingfa³ Liu Honglu⁴ Wu Wenyong⁴ Fan Yongshen^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China

2. Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Henan Province, Xinxiang 453002, China

3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract: An experiment on six Venturi injectors in Beijing was carried out. Based on theory studies, the differences of fertilization performance including fertilizer suction amount, the inlet discharge, the critical discharge and the critical pressure were analyzed and the regression models were built. It showed that the fertilizer suction amount and the inlet discharge were affected by the inlet and the outlet pressure directly. Domestic brands YR and RF were sensitive to the pressure fluctuation, while foreign models NF and AD could adjust to work environment better. The critical pressure of brands NF and AD-1 were very low, thus these models have a long working range. In contrast, the critical pressure of the models RF and YR got to a half of the inlet pressure for a normal fertilization, and this means they have a short working range.

Key words: Venturi injector Fertilization performance Fertilizer suction amount Inlet discharge Critical pressure Critical discharge

引言

施肥器是微灌系统的重要组成部分之一,通常安置在灌溉系统首部进行施肥作业。目前常用的施

肥器有压差式施肥罐、文丘里施肥器和水力驱动注肥泵等。其中文丘里施肥器价格低廉、结构简单、生产容易、使用方便,随着节水农业的发展,其在园林、园艺和设施农业等方面的应用越来越广。

收稿日期: 2012-04-05 修回日期: 2012-08-28

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD25B01)和北京市农业科技资助项目(20080509)

作者简介: 韩启彪,助理研究员,主要从事节水灌溉技术与设备研究,E-mail: hanbiaoedu@126.com

通讯作者: 黄兴法,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术和水资源高效利用研究,E-mail: huangxingfa@cau.edu.cn

国外不少学者对文丘里施肥器进行了研究,研究涉及了文丘里施肥器的注肥过程、施肥效果及结构优化和操作规程制定等,并对文丘里施肥器的应用进行了系统总结^[1-7]。国内研究目前集中在理论公式的推演、流体数值模拟及产品系列开发等方面^[8-13]。同时,出于灌溉自动化的需要,对文丘里施肥器的自动控制性能亦有一定报道^[14-15]。目前,数值模拟已成为文丘里管研究的重要手段^[16]。由于理论推求和数值模拟都对文丘里管结构进行了一定简化,使得结论与文丘里施肥器实际性能有一定差距,这引起部分学者注意并对一些文丘里施肥器吸肥性能进行了实测^[17-18]。然而,文丘里施肥器产品繁多,性能不一,仅以少量文丘里施肥器为研究对象,其成果难以具有代表性,在应用中难免有一定局限,基于此,本文采用试验分析方法,对北京地区微灌上常用的6种文丘里施肥器的吸肥性能进行比较分析,以期对文丘里施肥器的优化及应用选型提供一定的帮助。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验数据来自于2008年在北京市水利科学研究所门头沟节水器具检测大厅进行的文丘里施肥器检测试验。试验选用了北京地区微灌上常用的6种文丘里施肥器:国内品牌2种,代号定为YR、RF;国外品牌2种,代号定为NF、AD。其中AD为组装式文丘里施肥器,本试验测试了3种组装规格,代号定为AD-1、AD-2和AD-3。各施肥器结构参数见表1。

表1 文丘里施肥器结构参数

Tab.1 Structural parameters of Venturi injectors

代号	接口形式	进口直径/mm	喉管直径/mm	吸液管直径/mm
YR	承插式	20.0	4.5	8.0
RF	承插式	20.0		3.0
NF	外螺纹	16.0	2.8	6.0
AD-1	外螺纹	16.0	4.0	8.0
AD-2	外螺纹	16.0	5.0	8.0
AD-3	外螺纹	16.0	6.0	8.0

1.2 试验装置与方法

设计并制作了一套施肥器吸肥性能检测装置^[19],该装置由供水管路、计算机等组成(图1)。参照微灌系统施肥装置常规安装模式,文丘里施肥器与主管并联,主管采用 $\phi 50$ 的PVC管,其上安装主管道流量计用以测量主管流量,在施肥节制阀(2"施肥阀)的上、下游主管上安装压力传感器I和II用以测量施肥管道进口压力 p_1 和出口压力 p_3 。

施肥管道采用 $\phi 25$ 的PVC管,进、出口处分别安装流量计I和II,用来测量计算施肥管道的入口流量(流量计I读数)和施肥器的吸肥量(流量计II和I读数之差)。使用计算机对测试数据进行采集和处理,试验时通过编制的采集软件,计算机每隔6s采集瞬时流量、压力数据1次,试验后数据以Excel表形式输出,直接进行电子化处理,提高了试验效率和试验精度。

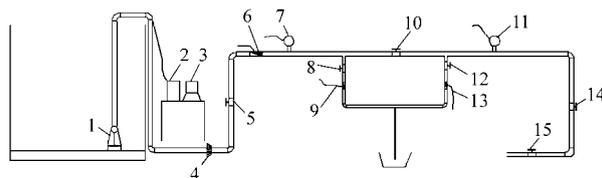


图1 文丘里施肥器试验装置示意图

Fig.1 Schematic drawing of test device for Venturi injectors

1.潜水泵 2.变频柜 3.计算机 4.逆止阀 5.平口球阀 6.主管道流量计 7.压力传感器I 8.施肥管道进口控制阀 9.流量计I 10.施肥节制阀 11.压力传感器II 12.施肥管道出口控制阀 13.流量计II 14.控制阀 15.回水控制阀

目前,国家尚未颁布微灌文丘里施肥器检测标准,因此本文在前人常规试验方法基础^[17-18]上,参照其他类似标准^[20],并结合检测装置,采用试验方法如下:试验过程中,使用潜水泵和变频柜获得试验所需的水源条件。以压力作为可控因素,通过施肥节制阀、控制阀、回水控制阀调节得到不同压力下入口流量、吸肥量等参数的变化。压力调控采用如下方法:变频泵设定压力0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35和0.40MPa7个水平,在各水平下,保持施肥节制阀开合 75° ,回水控制阀全开,调节控制阀的开合角度,使其从 0° 按 15° 变化递增至 60° ,这样进、出口压力均在相应范围内随机改变,调控压力变化范围见表2。

表2 文丘里施肥器压力调控组合

Tab.2 Pressure regulation combination for Venturi injectors

泵设定压力	进口压力 p_1	出口压力 p_3
0.10	0.050 ~ 0.055	0.002 ~ 0.045
0.15	0.075 ~ 0.085	0.003 ~ 0.065
0.20	0.110 ~ 0.120	0.004 ~ 0.090
0.25	0.145 ~ 0.160	0.010 ~ 0.125
0.30	0.180 ~ 0.200	0.006 ~ 0.150
0.35	0.220 ~ 0.245	0.007 ~ 0.195
0.40	0.260 ~ 0.290	0.008 ~ 0.230

2 试验结果与分析

2.1 吸肥量

在文丘里施肥器正常吸肥范围内,若不计吸入

管路的各种损失,吸肥量的理论计算公式为^[8]

$$q = a \sqrt{-2g(h + p_2/\gamma)} \quad (1)$$

式中 q ——吸肥量, L/h

a ——吸管截面积, m^2

p_2 ——喉管压力, Pa

γ ——流体容重, N/m^3

h ——文丘里管中心线与储肥罐肥液面之间的距离, m

g ——重力加速度, m/s^2

喉管压力 p_2 与进、出口压力等水力性能参数和文丘里管结构性能参数之间函数关系为^[9]

$$p_2 = \left[\left(\frac{1 - C_2}{d_2^4} - \frac{1 - C_1}{d_3^4} \right) \frac{8}{K_2 g \pi^2} + 1 \right] \Delta p + p_3 \quad (2)$$

其中 $\Delta p = p_1 - p_3$

式中 d_2 ——文丘里管直径, mm

d_3 ——喉管处直径, mm

C_1 ——前端倾角阻力系数

C_2 ——压力表与文丘里管前端间管路阻力系数

K_2 ——总阻力综合参数

Δp ——进、出口压差, Pa

分析式(1)和(2)可知:文丘里施肥器的吸肥量与其结构参数及进、出口压力有关,对于特定的文丘里施肥器,其结构参数不变,吸肥量的平方 q^2 应与进、出口压力 p_1 、 p_3 呈线性关系。由此建立吸肥量回归模型

$$q = (Ap_1 + Bp_3 + C)^{1/2} \quad (3)$$

式中 A 、 B 、 C ——经验参数

依据式(3),使用 SPSS 软件对测试数据进行处理,建立了6种施肥器吸肥量的回归模型,见表3。可以看出:回归模型的决定系数 R^2 均较高,基本都在0.90以上,因此模型可用来计算不同进、出口压力下各施肥器的吸肥量。

表3 吸肥量与进、出口压力回归模型

Tab.3 Regression models of fertilizer suction amount and inlet and outlet pressures

代号	回归模型	决定系数 R^2
YR	$q = (379.661.7p_1 - 909.253p_3 - 4.217.1)^{1/2}$	0.997
RF	$q = (104.653.0p_1 - 395.572p_3 - 2.528.4)^{1/2}$	0.992
NF	$q = (96.361.8p_1 - 159.637p_3 + 4.908.4)^{1/2}$	0.757
AD-1	$q = (60.268.4p_1 - 151.312p_3 - 878.5)^{1/2}$	0.978
AD-2	$q = (93.998.1p_1 - 220.735p_3 - 1.097.2)^{1/2}$	0.980
AD-3	$q = (113.472.9p_1 - 188.794p_3 - 1.156.5)^{1/2}$	0.912

结合试验结果和回归模型可以看出:同一压力条件下,YR吸肥量较大,AD-1较小,在进口压力

0.15 MPa,出口压力为零时,YR吸肥量可达230 L/h,而AD-1吸肥量仅为93 L/h。文丘里施肥器吸肥量随进口压力的增大而增大,6种文丘里施肥器中增幅最快的是YR,其后依次是AD-3、RF、NF和AD-2,AD-1增加最慢。吸肥量随出口压力的减小而增大,增大最快的仍是YR,其后依次是RF、AD-2、AD-3、NF,而AD-1增大仍最慢。

结合理论计算公式认为,造成这种差异的主要原因是各种文丘里施肥器结构有很大区别,同样压力条件下,形成的喉管负压不同,从而导致吸肥量变化显著。

由于吸肥量的这种差异,对于6种施肥器的选型来说,YR、RF吸肥量随压力变化快,因此需要考虑相对稳定的运行环境以维持稳定的吸肥效果,而AD和NF则可用于运行状态波动情况,YR可在较小压力状态下获得较大的吸肥量,可用于压力条件不足但需肥量较大的地方。

2.2 入口流量

并联文丘里管入口流量理论计算公式^[9]为

$$Q_2 = \sqrt{\frac{p_1 - p_3}{K_2 \gamma}} \quad (4)$$

式中 Q_2 ——文丘里管入口流量, m^3/s

可以看出:文丘里管入口流量的平方 Q_2^2 与进口压力 p_1 和出口压力 p_3 呈线性关系,由此建立回归模型

$$Q_2 = (\alpha p_1 + \beta p_3 + \delta)^{1/2} \quad (5)$$

式中 α 、 β 、 δ ——经验参数

依据式(5),使用 SPSS 软件建立了6种施肥器入口流量回归模型,见表4。可以看出:入口流量与进口压力呈正相关增长,与出口压力呈负相关增长。相同压力条件下,AD-3和RF入口流量较大,而AD-1和NF入口流量较小。当出口压力为零,进口压力在0.10 MPa左右时,AD-3、RF、NF、AD-1入口流量分别为1.38、0.93、0.66、0.45 m^3/h ,AD-3的入口流量超过了AD-1的3倍。6种施肥器入口流量随进、出口压力的变化趋势也明显不同,入口流量

表4 入口流量与进、出口压力回归模型

Tab.4 Regression models of inlet discharges and inlet and outlet pressures

代号	回归方程	决定系数 R^2
YR	$Q_2 = (4.3p_1 - 2.5p_3 + 0.012)^{1/2}$	0.999
RF	$Q_2 = (7.0p_1 - 4.1p_3 - 0.003)^{1/2}$	0.993
NF	$Q_2 = (2.2p_1 - 0.7p_3 + 0.037)^{1/2}$	0.984
AD-1	$Q_2 = (1.4p_1 - 1.0p_3 - 0.0002)^{1/2}$	0.943
AD-2	$Q_2 = (4.6p_1 - 3.5p_3 + 0.009)^{1/2}$	0.989
AD-3	$Q_2 = (13.4p_1 - 8.5p_3 + 0.075)^{1/2}$	0.982

随进口压力增长最快的是 AD-3, 其后依次是 RF、AD-2、YR、NF 和 AD-1; 入口流量随出口压力变化最快的是 AD-3, 其后依次是 RF、AD-2、YR、AD-1 和 NF。

6 种施肥器入口流量受进出口压力的影响有差异, 主要是由于施肥器的结构不同, 使运行时总阻力综合参数 K_2 不同, 从而造成了入口流量的这种变化。

综上所述可知: NF 和 AD-1 施肥器入口流量对压力变化不敏感, 适用于压力变化范围大、但入口流量变化区间相对较小的地方, AD-3 和 RF 等适用于入口流量变化区间大, 但压力能耗区间小的地方。由于入口流量直接影响着肥液浓度, NF 等入口流量变化区间小, 肥液浓度会相对稳定, 而 AD-3 和 RF 等入口流量变化大, 浓度调节将更加方便。

2.3 临界运行参数确定

2.3.1 临界流量

临界流量是指文丘里施肥器开始吸肥时并联施肥管道所通过的流量。其理论计算公式为^[8]

$$Q_{\min} = A_1 \sqrt{\frac{2g \left(h + \frac{p_1}{r} \right)}{\left(\frac{d_2}{d_3} \right)^4 - 1}} \quad (6)$$

式中 Q_{\min} ——临界流量, m^3/h

A_1 ——入口截面积, m^2

可以看出, 对于某种特定的文丘里施肥器, 在安装等工况固定的条件下, 参数 h 、 d_2 、 d_3 、 A_1 等均已确定, 此时影响临界流量的主要参数是进口压力 p_1 。据此, 建立临界流量回归模型

$$Q_{\min} = (a_1 + a_2 p_1)^{1/2} \quad (7)$$

式中 a_1 、 a_2 ——经验参数

分别依据式(6)和式(7)建立临界流量的理论计算式和回归模型, 见表5。由回归模型分析可知: 临界流量随进口压力的增加而增加, 但增大的快慢不同, 其中增加最快的是 AD-3, 其后依次是 RF、YR、AD-2, 施肥器 NF 的增加趋势最慢。按前理论分析, 不同施肥器临界流量随进口压力变化不同, 这主要是由于各施肥器结构参数不同引起的。从理论

表5 文丘里施肥器临界流量理论计算式与回归模型

Tab.5 Regression models of critical discharge

代号	回归模型	决定系数 R^2	理论计算式
YR	$Q_{\min} = (3.0p_1 + 0.02)^{1/2}$	0.999	$Q_{\min} = (4.9p_1 + 4 \times 10^{-9})^{1/2}$
NF	$Q_{\min} = (1.8p_1 + 0.008)^{1/2}$	0.993	$Q_{\min} = (0.7p_1 + 6 \times 10^{-10})^{1/2}$
AD-2	$Q_{\min} = (2.6p_1 + 0.06)^{1/2}$	0.987	$Q_{\min} = (7.5p_1 + 6 \times 10^{-9})^{1/2}$
AD-3	$Q_{\min} = (7.2p_1 + 0.016)^{1/2}$	0.982	$Q_{\min} = (15.7p_1 + 1 \times 10^{-8})^{1/2}$
RF	$Q_{\min} = (6.0p_1 + 0.049)^{1/2}$	0.999	$Q_{\min} = (4.9p_1 + 4 \times 10^{-9})^{1/2}$

角度来看, 文丘里管进口管径越小, 进口管径和喉管管径的比值越大, 文丘里管能正常吸肥的临界流量就会越小。

理论计算式与试验回归模型比较, 理论值和回归值存在很大差距, 施肥器 YR、AD-2、AD-3 理论值都比回归值要大, 这与文献[17~18]所得结论相似, 但 NF 和 RF 则相对偏小; RF 和 YR 理论值与回归值趋势较接近, AD-2、AD-3、NF 差距则较大。这主要是因为理论值是按照传统文丘里管结构原理推导的, 在计算中也省略了很多其他水力要素, 但实际上很多文丘里施肥器不再是传统的文丘里管, 尤其是国外的文丘里施肥器, 为弥补传统文丘里管的不足, 结构上都作了很大的改进, 造成理论值与实测值相差较大。因此, 在实际应用中, 不能只使用理论公式推导临界流量, 应通过试测进行校正。

2.3.2 临界压差

临界压差是指不同进口压力下, 施肥器开始吸肥的压差。进行灌溉施肥时, 当进口压力不变情况

下压差必须保证大于临界压差, 文丘里施肥器才能正常吸肥。

利用数据得出计算 5 种施肥器临界压差的经验公式, 如图 2 所示。决定系数均在 0.97 以上, 可用来估算设定进口压力下, 施肥器正常工作区间下限。

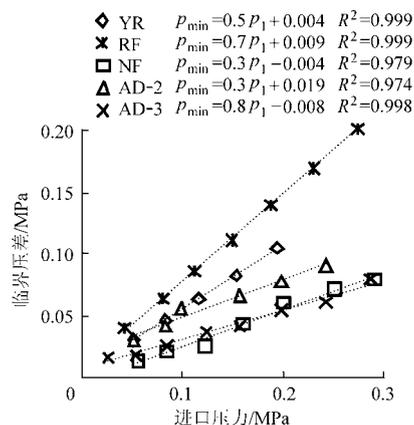


图2 文丘里施肥器临界压差经验回归模型

Fig.2 Regression models of critical pressure

可以看出,文丘里施肥器临界压差与进口压力呈显著线性关系,进口压力升高,临界压差随之增大。5种施肥器临界压差不一,变化趋势不同,进口压力相同时,RF临界压差最大,其后是YR和AD-2,NF和AD-3最小;RF临界压差随进口压力增大最快,其次是YR,而AD-2、AD-3和NF增大趋势基本相同。

这说明进口压力相同时,施肥器的工作状态不同,NF和AD-3的工作区间最大,性能最好,AD-2次之,国产施肥器RF、YR工作区间相近,相比国外要差,临界压差都在进口压力的1/2以上,即若要正常吸肥,需产生一半以上的水头损失。

3 结论

(1) 文丘里施肥器的吸肥量与进口压力正相关,与出口压力负相关。文丘里管的不同结构造成了各种文丘里施肥器喉管负压不同,使得相同压力条件下,YR吸肥量较大,AD-1吸肥量较小,在进

口压力0.15 MPa,出口压力为零时,YR吸肥量可达230 L/h,AD-1吸肥量仅为93 L/h。在选择使用上,YR、RF需要更加稳定的压力条件,而AD系列和NF则更能适应运行状态波动情况。然而YR可用于需肥量较大的地方。

(2) 与理论分析不同,文丘里施肥器的入口流量不仅与压差有关,还受进、出口压力的综合影响。当出口压力为零,进口压力在0.10 MPa左右时,AD-3的入口流量超过了AD-1的3倍。在选择使用上,NF和AD-1可用于压力波动大、但对入口流量要求稳定的地方,能更好的保证肥液浓度稳定,而AD-3等可用于入口流量变化区间大,但压力能耗区间小的地方,在压力区间内可小范围调节肥液浓度。

(3) 由于结构的改变,实际应用中,不能只使用理论公式推求临界流量,应通过实测。YR、RF正常工作区间小,临界压差都在进口压力的1/2左右,如工作条件不满足将产生较多倒吸现象。而NF和AD-3的工作区间则要大很多。

参 考 文 献

- 1 Yuan Z, Choi C Y, Waller P M, et al. Effects of liquid temperature and viscosity on Venturi injectors [J]. Transactions of the ASAE, 2000,43(6):1441~1447.
- 2 Bracy R P, Parish R L, Rosendale R M. Fertigation uniformity affected by injector type [J]. Hort Technology, 2003,13(1):103~105.
- 3 Neto I E L, Porto R D M. Performance of low-cost ejectors [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(2): 122~128.
- 4 Manzano Juarez J, Palau S G. Hydraulic modeling of Venturi injector by means of CFD [C] //2005 ASAE Annual International Meeting, Paper No. 052070, Tampa, FL, USA.
- 5 Roberto V, Montoya Y E. Operation setting nomograms for Unidrench Venturi injector[J]. Agronomía Colombiana, 2010,28(2): 303~318.
- 6 Burt C M, O'Connor K, Ruehr T. Fertigation[M]. San Luis Obispo, CA California Polytechnic State University,1995:40~45.
- 7 Hanson B, O'Connell N, Hopmans J, et al. Fertigation with microirrigation[M]. Santa Barbara, CA: University of California, 2006:43~50.
- 8 封俊,沈雪民,刘春和,等.文丘里滴灌施肥器水力性能的研究[J].节水灌溉,1992(1):41~43.
Feng Jun, Shen Xuemin, Liu Chunhe, et al. Research on the hydraulic performance of Venturi injector in drip irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 1992(1):41~43. (in Chinese)
- 9 李百军,毛罕平,李凯.并联文丘里管吸肥装置的研究及其参数选择[J].排灌机械,2001,19(1):42~45.
Li Baijun, Mao Hanping, Li Kai. A study on the parallel connection Venturi tube and its parameter selection [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001,19(1):42~45. (in Chinese)
- 10 Huang Xingfa, Li Guangyong, Wang Miao. CFD simulation to the flow field of Venturi injector[J]. IFIP International Federation for Information Processing,2009,294(2):805~815.
- 11 孙艳琦.文丘里施肥器结构参数对吸肥性能的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
Sun Yanqi. Effects of Venturi structural parameters on the absorption fertilizer performance [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 12 严海军,初晓一.喉管直径对文丘里施肥器性能影响的数值模拟[J].排灌机械工程学报,2011,29(4):359~363.
Yan Haijun, Chu Xiaoyi. Numerical simulation for influence of throat diameter on Venturi injector performance [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(4):359~363. (in Chinese)
- 13 金永奎,夏春华,方部玲.文丘里施肥器系列的研制[J].中国农村水利水电,2006(5):14~17.
Jin Yongkui, Xia Chunhua, Fang Buling. Research and development of venturi fertilizer applicator series [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(5):14~17. (in Chinese)
- 14 李凯,毛罕平,李百军.混药混肥装置控制性能分析[J].农业机械学报,2003,34(1):50~53.
Li Kai, Mao Hanping, Li Baijun. Analysis on control performance of Various pesticide or fertilizer mixers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(1):50~53. (in Chinese)

- Society for Agricultural Machinery, 2010,41(1):96~100. (in Chinese)
- 2 马守祥,张兆嘉. 中国稻壳发电技术[J]. 农业机械学报,1991,22(3):97~99.
 - 3 Rozainee M, Ngo S P, Salema A A. Effect of fluidising velocity on the combustion of rice husk in a bench-scale fluidised bed combustor for the production of amorphous rice husk ash [J]. *Bioresource Technology*, 2008,99(4):703~713.
 - 4 Prasetyoko D, Ramli Z, Endud S, et al. Conversion of rice husk ash to zeolite beta [J]. *Waste Management*, 2006,26(10):1173~1179.
 - 5 Nehdi M, Duquette J, Damatty A E. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003,33(8):1203~1210.
 - 6 Chandrasekhar S, Pramada P N. Rice husk ash as an adsorbent for methylene blue—effect of ashing temperature [J]. *Adsorption*, 2006,12(1):27~43.
 - 7 Kordatos K, Gavela S, Ntziouni A. Synthesis of highly siliceous ZSM-5 zeolite using silica from rice husk ash [J]. *Micropor and Mesopor Materials*, 2008,115(1~2):189~196.
 - 8 Chandrasekhar S, Pramada P N, Majeed J. Effect of calcination temperature and heating rate on the optical properties and reactivity of rice husk ash [J]. *Journal of Materials Science*, 2006,41(23):7926~7933.
 - 9 陈龙,高枫,黄飞,等. 稻壳制备活性炭和二氧化硅的研究进展[J]. 辽宁化工,2010,39(6):631~634.
Chen Long, Gao Feng, Huang Fei, et al. Research progress in preparation of activated carbon and silica from rice husk [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2010,39(6):631~634. (in Chinese)
 - 10 Nair D G, Fraaij A, Klaassen A A K, et al. A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008,38(6):861~869.
 - 11 谢定,韩丹妮,欧阳建勋,等. 稻壳综合利用技术与经济浅析[J]. 粮食科技与经济,2010,35(3):35~37.
 - 12 陈应泉,王贤华,钱柯贞,等. 热解和灼烧温度对稻壳灰特性的影响[J]. 华中科技大学学报,2011,39(5):123~127.
Chen Yingquan, Wang Xianhua, Qian Kezhen, et al. Influence of pyrolysis and combusting temperature on characteristics of rice husk ash [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2011,39(5):123~127. (in Chinese)
 - 13 Paya J, Monzo J, Borrachero M V, et al. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001,31(2):227~231.
 - 14 Srivastava V C, Mall I D, Mishra I M. Optimization of parameters for adsorption of metal ions onto rice husk ash using Taguchi's experimental design methodology [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008,140(1~3):136~144.
 - 15 Chatveera B, Lertwattanaruk P. Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009,90(3):1435~1441.
 - 16 Krishnarao R V, Subrahmanyam J, Kumar T J. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001,21(1):99~104.
 - 17 Chandrasekhar S, Satyanarayana K G, Pramada P N, et al. Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk—an overview [J]. *Journal of Materials Science*, 2003,38(15):3159~3168.
 - 18 蔡瑞环. 高活性稻壳 SiO₂ 的制备及其在超高性能混凝土中的应用[D]. 广州:暨南大学,2008.
Cai Ruihuan. Preparation of high active rice husk silica and its application to the super high performance concrete [D]. *Guangzhou: Jinan University*, 2008. (in Chinese)
 - 19 李洪涛,李炳熙,徐有宁,等. 稻壳灰显色特征试验研究[J]. 可再生能源,2011,29(4):53~57.
Li Hongtao, Li Bingxi, Xu Youning, et al. Experimental study on color characteristics of rice husk ash [J]. *Renewable Energy Resources*, 2011,29(4):53~57. (in Chinese)
 - 20 陆飞,王永桥,章静,等. 稻壳燃烧特性与动力学模型的研究[J]. 能源研究与利用,2009(5):10~14.

~~~~~

(上接第 117 页)

- 15 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等. 基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(8):105~110.  
Li Jianian, Hong Tiansheng, Feng Ruijue, et al. Design and experiment of Venturi variable fertilizer apparatus based on pulse width modulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(8):105~110. (in Chinese)
- 16 陈作炳,豆海建,陈思维,等. 文丘里管流场的数值研究[J]. 中国煤炭,2005(4):61~63.  
Chen Zuobing, Dou Haijian, Chen Siwei, et al. Numerical study of Venturi tube's flow field [J]. *China Cement*, 2005(4):61~63. (in Chinese)
- 17 李久生,王迪,栗岩峰,等. 现代灌溉水肥管理原理与应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008:10~16.
- 18 严海军,初晓一,王敏,等. 微灌系统文丘里施肥器吸肥性能试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(3):251~255.  
Yan Haijun, Chu Xiaoyi, Wang Min, et al. Injection performance of Venturi injector in micro-irrigation system [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010,28(3):251~255. (in Chinese)
- 19 刘洪禄,吴文勇,郝仲勇,等. 一种施肥器智能测试装置:中国,CN101876596A[P]. 2010-11-03.
- 20 GB/T 21403—2008/ISO 15873:2002 喷灌设备 文丘里式差压液体添加射流器[S]. 2008.